

УДК 528.88.042:528.852.5

**В. І. Лялько, О. І. Сахацький, Ю. В. Костюченко, І. Г. Артеменко,
Г. М. Жолобак, О. І. Левчик, Д. М. Мовчан**

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України», Київ

КОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ БАЛАНСУ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ З МЕТОЮ УТОЧНЕННЯ ЇХНЬОЇ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ

В Україні впродовж 2006–2011 рр. спеціалісти Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України працюють над створенням методики моніторингу балансу парникових газів з метою уточнення обсягів їхніх викидів та поглинання на основі використання даних супутникових зйомок. Запропоновані супутникові методи дозволяють проводити незалежний моніторинг балансу вуглекислого газу в атмосфері. За експертними оцінками кількість CO₂ перевищує 75 % від загальної кількості викидів парникових газів у межах території України. За даними супутникової зйомки пропонується здійснювати оцінку балансу антропогенних викидів та природного поглинання вуглекислого газу рослинним покривом за рахунок фотосинтетичної активності на значних територіях та забезпечити моніторинг вмісту CO₂ в атмосфері в різних ландшафтно-кліматичних зонах та територіальних одиницях України.

ВСТУП

Кругообіг вуглецю в природі є важливим елементом функціонування природних екосистем. На сьогоднішній день антропогенна діяльність часто призводить до значного порушення цього балансу. Це може чинити вплив на інші елементи земної системи, зокрема на елементи кліматичної системи. А подібні зміни, як правило, призводять до негативних наслідків в соціально-економічній сфері нашого суспільства.

Попередні результати досліджень, в яких бере участь і Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, свідчать, що за вмістом CO₂ в атмосфері, станом змін рослинного покриву та викидів в атмосферу CO₂ промисловими підприємствами є підстави вважати, що антропогенний вплив на вуглецевий баланс має місце, в тому числі і для території України.

При оцінках карбонового циклу, балансу парникових газів і їхнього впливу на клімат ще є значні труднощі та невизначеності, які призводять до суттєвих розбіжностей в розрахунках па-

раметрів природних процесів та у їхніх прогнозах. Наявність супутникових даних кардинально змінює ситуацію на краще.

При обробці космічних знімків з метою вирішення поставлених задач можуть застосовуватись різні підходи. В першу чергу може використовуватись класифікація земних покривів на основі космічних знімків та наземних даних.

В результаті класифікації багатоспектральних космічних зображень досить успішно можуть виділятися різні класи земного покриття. Вдало виділяються лісові рослинні угруповання, трав'яниста рослинність, агрофітоценози. Відомо, що у межах названих типів рослинного покриву процеси енергомасообміну, включаючи карбоновий та водний цикли, та процеси газообміну мають специфічні ознаки та певні межі змін своїх кількісних характеристик. Аналіз класифікованого космічного зображення з використанням накопичених теоретико-експериментальних баз знань дозволяє виконати обґрунтовану трансформацію класифікованих даних в інші карти з метою оцінки параметрів вказаних природних процесів.

По-друге, дані космічної зйомки дозволяють проводити прямі вимірювання концентрації пар-

никових газів в атмосфері та виконувати розрахунки їхнього поглинання рослинним покривом шляхом визначення кореляції спектральних характеристик космічних знімків з параметрами інтенсивності процесів фотосинтезу. Крім того, використання матеріалів космічних зйомок різних років дозволяє говорити про стан навколишнього середовища у попередні роки і про зміни, зокрема в ландшафтах, які відбулися за час, що минув.

Таким чином, застосування супутникових зйомок дозволяє здійснювати незалежну оцінку балансу антропогенних викидів та природного поглинання вуглекислого газу і надає можливість проводити такі розрахунки більш обґрунтовано та надійно.

ФОТОСИНТЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ОСНОВНИХ ВИДІВ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ

Розглядаючи задачу про тенденції змін клімату, перш за все, виходячи з панівної наразі концепції про причини глобальних змін, слід проаналізувати ключові параметри вуглецевого циклу та визначити основні змінні, що характеризують базові джерела і стоки парникових газів.

Сучасний глобальний цикл вуглецю складається з двох менших циклів. *Перший* з них зумовлений взаємодією двоокису вуглецю атмосфери і природних вод. *Другий цикл* (рис. 1) зумовлений двома фундаментальними біологічними процесами в біосфері — фотосинтезом і диханням. Він полягає у зв'язуванні двоокису вуглецю в ході фотосинтезу та новому утворенні його у процесі життєдіяльності рослин і тварин, а також при розкладанні органічних залишків.

Фотосинтез є основною і контрольною ланкою глобальних біогенних циклів вуглецю, азоту і води. Сукупна маса рослин не тільки формує основний активний резервуар органічного вуглецю, але і відіграє роль значного глобального кліматичного фактора. Рослинний покрив виступає одним з провідних претендентів на роль демпфера наслідків парникового ефекту. Річний результат фотосинтезу становить 120 Гт CO_2 , з яких близько половини є первинною продукцією суходолу [2].

Валова первинна продуктивність (GPP) за рік — це маса вуглецю, яка пройшла через фотосин-

тетичне карбоксилювання. *Чиста первинна продуктивність (NPP)* — різниця між GPP та всіма емісійними втратами вуглецю рослинного покриву за рік. *Фотосинтетичний «стік» вуглецю (Ph)* — це вуглецевий баланс фотосинтетичного вуглецю поточного періоду вегетації.

Поняття чистої первинної продуктивності фотосинтезу і фотосинтетичного «стоку» вуглецю тотожні тільки у однорічних рослин. Структура фотосинтетичного стоку вуглецю обумовлена газообміном автотрофної (донорної) і гетеротрофної (акцепторної) частин рослин, а також втратами вуглецю при переносі від першої до другої протягом періоду вегетації. Так, для хвойних деревостанів *Ph* становить 1.07 *NPP* [2].

Для процесу фотосинтезу характерна значна варіабельність, тому що на нього впливає комплекс взаємопов'язаних зовнішніх і внутрішніх факторів (рис. 1). Деякі зовнішні фактори, такі як світло і CO_2 , безпосередньо впливають на фотосинтез, інші (наприклад, вода і мінеральні речовини) нерідко діють опосередковано. Протягом дня обмежувальним може бути спочатку один, а потім інший фактор. Спостерігається також сезонна заміна одного обмежувального фактора іншим: узимку і навесні фотосинтез обмежує температура, влітку — опір продихів, концентрація двоокису вуглецю і світло. Найважливішими внутрішніми факторами, що впливають на фотосинтез, є видова належність, вік і структура листків, розмір, кількість і реакція продихів, вміст хлорофілу, внутрішній водний дефіцит, використання і нагромадження вуглеводів. На організмовому і ценотичному рівні до цього додаються архітектоніка і взаєморозташування рослин, щільність насадження тощо, внаслідок чого спостерігається варіювання листкового і хлорофільного індексів рослинного покриву.

Використання індексних показників: значень у проекції на поверхню землі сукупної площі листів (*листяний індекс LI*), маси хлорофілу (*хлорофільний індекс XI*) рослинного покриву є способом кількісної оцінки середнього для даних кліматичних умов результату фотосинтезу, що виражається в кількості зв'язаного за рік атмосферного вуглецю у фітомасі. Накладення на цю оцінку обмежень, які диктуються конкрет-

ними умовами довкілля, дозволяє оцінити результат поточного продукційного процесу.

На загал величина фотосинтезу безпосередньо зв'язана з площею асимілювальних органів, тобто з листовою поверхнею фітоценозу, що у свою чергу визначається забезпеченістю вологою. Відповідно і площа листової поверхні фітоценозу в умовах крайньої нестачі вологи мінімальна і наростає зі збільшенням вологості, досягаючи максимуму при оптимальній вологозабезпеченості. Зростання листового індексу супроводжується ростом сумарної продукції фотосинтезу, що при збільшенні щільності листової маси і посиленні взаємного затінення листків досягає насичення, і її подальший ріст припиняється. Таке насичення, наприклад, у сільськогосподарських культурах зазвичай настає при листовому індексі, який дорівнює 4–6 [3].

Між різними групами рослин (у тому числі різними життєвими формами) спостерігаються великі розбіжності значень параметрів фотосинтетичної активності (таблиця). Відомо, що більшість дикорослих трав'янистих квіткових рослин значно інтенсивніше, ніж деревні, асимілюють вуглець (світлолюбні трави 20–50 мг CO₂ на 1 дм² листової поверхні за годину, світлові листки листопадних дерев — 10–20 мг·дм⁻²год⁻¹). Разом з тим злаки, що складають основу степових фітоценозів, значно поступаються деревам за цим показником (6–12 мг·дм⁻²год⁻¹).

Як відомо, в Україні найбільші площі займає степова рослинність та агрозони, на яких вирощуються переважно зернові та технічні культури. Лісами вкрито близько 15 відсотків площі

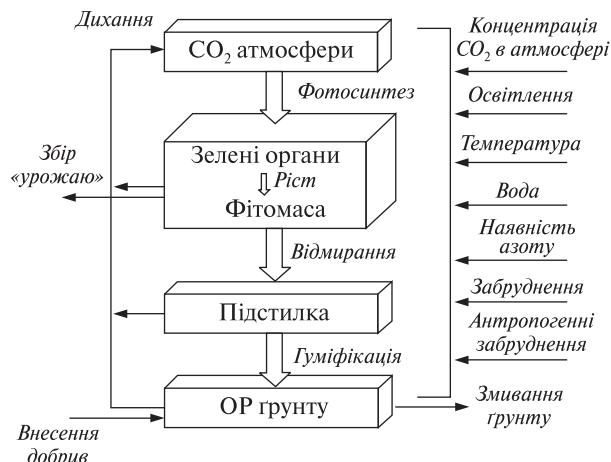


Рис. 1. Загальна структурна модель [1] кругообігу вуглецю в екосистемі

нашої держави. Звісно, зустрічаються і інші типи рослинності, які теж беруть участь в процесі засвоєння вуглецю. Для того щоб вирахувати вклад основних типів рослинного покриву у всеукраїнський «стік» вуглецю на основі інтегративного підходу, який поєднує дистанційні інструментальні методи та велику кількість наземних вимірювань, нами було проаналізовано широкий спектр наукових робіт, присвячених вивченню екофізіології фотосинтетичної активності окремих груп рослинності.

В табл. 1 на основі аналізу літературних джерел зокрема [2, 3], приведено деякі важливі параметри, що характеризують процес фотосинтезу стосовно основних ботаніко-географічних формацій (зон рослинності), які розміщені на території України.

Таблиця 1. Середні фотосинтетичні показники основних ботаніко-географічних формацій (адаптовано для умов України)

Формація	Питомий хлорофіл, кг·га ⁻¹	Нетто поглинання CO ₂ , мг·дм ⁻² год ⁻¹	Листковий індекс (ЛІ), м ² м ⁻²	Первинна нетто-продуктивність NPP, т·га ⁻¹ рік ⁻¹	Питомий річний стік Ph, т·га ⁻¹ рік ⁻¹
Болота	20.0–30.0	20–40	7	30	2
Хвойні ліси	20.0–40.0	4–15	12	8–13	2–4
Листяні ліси (літньозелені)	20.0–40.0	5–20	5	12	5
Луки	13.0–20.0	20–50	3.6	6	2.7
Лісостеп	13.0–15.0	5–15	4	7	4.5
Степ	13.0–24.0	6–12	3.6	6	4
Водойми	2.0–5.0	4–6		4	0.6
Агрозони	15.0–24.0	6–12	4	6.5	4

РЕЗУЛЬТАТИ ПОПЕРЕДНІХ ПІДРАХУНКІВ ЗМІН ПЛОЩ ЛАНДШАФТІВ ЗА ПЕРІОД 1990—2000 рр. ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗНІМКІВ «LANDSAT TM/ETM+» ЗА 1990—2000 рр. У МЕЖАХ ЗАХІДНИХ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

В контексті викладеного вище постає задача адекватного інтегрального моніторингу стану рослинних угруповань, і в першу чергу, змін ландшафтів. Як показує світовий досвід останніх 30 років, важливим інструментом такого моніто-

рингу є космічні спостереження. В табл. 2 наведено результати класифікації знімків «Landsat TM/ETM+» за 1990—2000 рр. в межах західних регіонів України, яку було проведено для визначення зміни площ класів ландшафтів (див. рис. 2).

Ці попередні дані потребують уточнення. За даними оцінки сигнатур помилка визначення площ окремих класів становить 20 %. Найбільша неузгодженість та помилки можуть бути пов'язані з віднесенням класу долин річок, лу-

Таблиця 2. Попередні дані про зміни площ класів ландшафтів за результатами класифікації знімків «Landsat TM/ETM+» за 1990—2000 рр. у межах західних регіонів України

Клас	Площа S (км ²) та її доля (%)		Приріст, %		
	1990 р.	2000 р.	1990 р.	2000 р.	
<i>Карпатський регіон</i>					
Хвойні ліси	6671.5	(22.8 %)	4669.9	(17.1 %)	-5.7
Листяні ліси, змішані, сади, парки, групи дерев	6128.9	(20.9 %)	8515.8	(29.3 %)	8.4
Агрозони	9994.1	(34.1 %)	9086.8	(31.3 %)	-2.9
Долини рік, луки, чагарники	4300.3	(14.7 %)	4414.3	(16.4 %)	1.7
Вирубки	1042.4	(3.6 %)	283.6	(1.0 %)	-2.6
Населені пункти	889.3	(3.0 %)	937.1	(3.2 %)	0.19
Вода	239.1	(0.9 %)	491.8	(1.7 %)	0.8
Хмари	—	0	665.8	(2.3 %)	2.3
Всього	29265.6	(100 %)	29065.0	(100 %)	
<i>Полісся</i>					
Хвойні ліси	17688.5	(19.4 %)	17524.7	(19.2 %)	-0.18
Листяні ліси, змішані, сади, парки, групи дерев	13128.6	(14.4 %)	10232.97	(11.2 %)	-3.2
Агрозони	27774.1	(30.5 %)	27481.5	(30.2 %)	-0.32
Долини рік, луки, чагарники	20502.2	(22.5 %)	19702.2	(21.6 %)	-0.9
Болота	3429.6	(3.8 %)	9898.9	(10.9 %)	7.1
Населені пункти	6574.6	(7.2 %)	2927.0	(3.2 %)	-4.0
Вода	1987.4	(2.2 %)	2883.9	(3.2 %)	1.0
Хмари	—	0	435.2	(0.5 %)	0.5
Всього	91085.1	(100 %)	91086.7	(100 %)	
<i>Південно-західний регіон</i>					
Хвойні ліси	6455.1	(5.5 %)	5879.5	(5.1 %)	-0.4
Листяні ліси, змішані, сади, парки, групи дерев	25417.5	(21.8 %)	36217.7	(31.3 %)	9.5
Агрозони	63738.1	(54.6 %)	55407.1	(47.8 %)	-6.8
Долини рік, луки, чагарники	15732.7	(13.5 %)	12694.8	(11.0 %)	-2.5
Населені пункти	3508.4	(3.0 %)	2261.2	(2.0 %)	-1.0
Вода	1883.7	(1.6 %)	2618.5	(2.3 %)	0.7
Хмари	—	0	719.3	(0.5 %)	0.5
Всього	116735.4	(100 %)	115798.0	(100 %)	

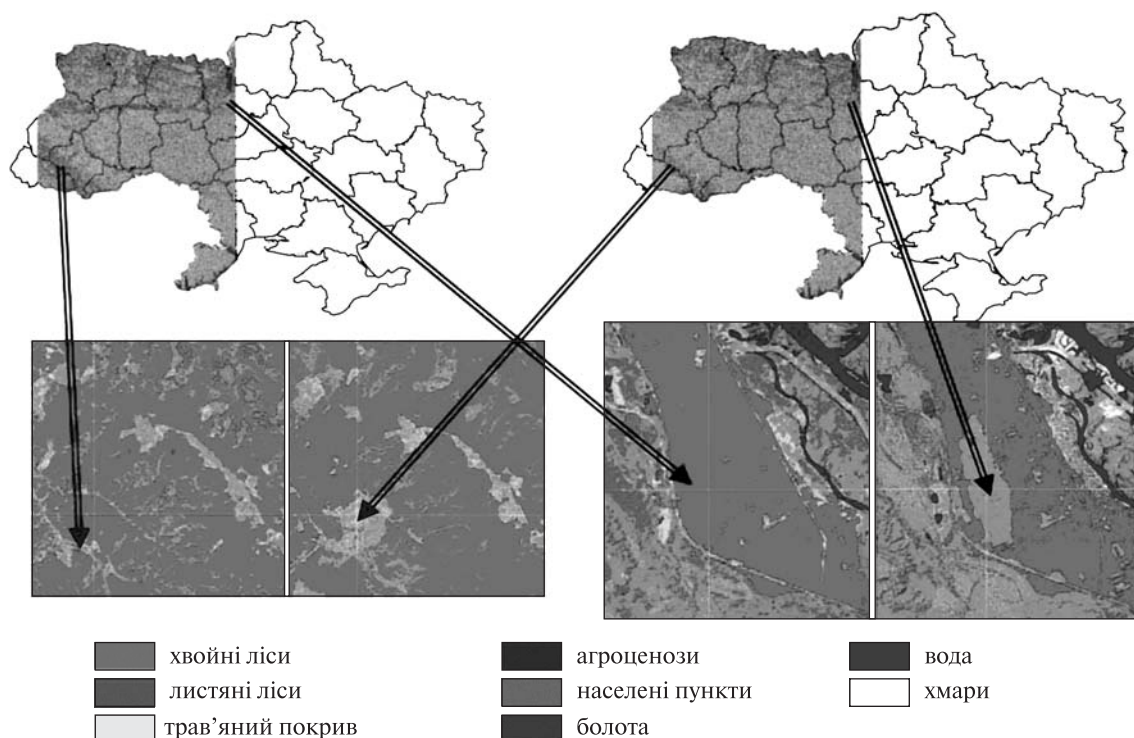


Рис. 2. Результати попередньої класифікації знімків «Landsat TM» за 1990 р. (зліва) та 2000 р. (справа)

ків та чагарників до агроценозів і навпаки. Крім того, листяні ліси, сади та парки іноді помилково займають площі луків та чагарників. Населені пункти часто класифікуються як листяні ліси та парки, а тіні від хмар — як водна поверхня.

Враховуючи вищезгадане, наведені дані будуть уточнюватись для більш якісної оцінки природних змін за період 1990—2000 рр.

ПРЯМІ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ В АТМОСФЕРІ ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

В рамках досліджень ЦАКДЗ вирішувалася задача оцінки інформативності даних спеціалізованих космічних зйомок з метою визначення вмісту CO_2 в атмосфері, в першу чергу над територією України. Для вирішення даної задачі були проаналізовані наявні дані. На основі аналізу було визначено, що дані інструмента SCIAMACHY, встановленого на супутнику «Envisat», є найбільш перспективними. Перш за все слід зазначити, що SCIAMACHY — це перший вста-

новлений на супутнику сенсор, що має змогу вимірювати глобальний розподіл вуглекислого газу в атмосфері [University of Bremen: IUP/IFE SCIAMACHY WFM-DOAS: http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/index.html]. Принцип дії цього приладу ґрунтується на вимірюваннях лінії поглинання молекул CO_2 в ІЧ-діапазоні. Більш детальний опис приладу міститься в роботі [7].

На основі даних SCIAMACHY вчені Інституту фізики навколишнього середовища (Institute of Environmental Physics — IUP, Бременський університет у Німеччині), отримали перші карти глобального розподілу CO_2 в атмосфері [European space Agency: http://www.esa.int/esaCP/SEM1DUQ08ZE_index_0.html]. Необхідно зазначити, що саме IUP був головним виконавцем проекту SCIAMACHY, тобто мав право першим обробити дані про глобальну концентрацію парникових газів у атмосфері. На основі отриманих карт було виконано розрахунки, що демонструють щомісячний розподіл вуглекислого



Рис. 3. Збільшення середньорічної концентрації CO₂ з 2003 по 2005 рр.

Таблиця 3. Зміна середньорічного вмісту CO₂ (%) в атмосфері

Області	2003–2004 р.	2004–2005 р.	2003–2005 р.
Закарпатська	0.554	0.51	1.064
Львівська	0.755	0.6	1.355
Івано-Франківська	0.465	0.487	0.952
Чернівецька	0.443	0.486	0.929
Тернопільська	0.443	0.486	0.929
Рівненська	0.465	0.509	0.974
Хмельницька	0.465	0.509	0.974
Житомирська	0.442	0.465	0.907
Вінницька	0.398	0.509	0.907
Полтавська	0.509	0.62	1.129
Харківська	0.598	0.643	1.241
Дніпропетровська	0.532	0.709	1.241
Київська	0.465	0.509	0.974
Черкаська	0.509	0.532	1.041
Кіровоградська	0.509	0.62	1.129
Миколаївська	0.509	0.62	1.129
Одеська	0.443	0.619	1.062
Херсонська	0.509	0.709	1.218
Крим	0.465	0.775	1.24
Чернігівська	0.731	0.399	1.13
Сумська	0.687	0.465	1.152
Запорізька	0.576	0.709	1.285
Донецька	0.576	0.709	1.285
Луганська	0.665	0.62	1.285

газу в атмосфері з січня 2003 по грудень 2005 рр. включно.

На основі даних була оцінена придатність даних SCIAMACHY для оцінки вмісту CO₂ в атмосфері над територією України. З цієї метою з даних IUP було виділено характеристики щомісячного розподілу вуглекислого газу в атмосфері над Україною з січня 2003 по грудень 2005 рр. Аналіз даних дозволив отримати усереднені дані щомісячного розподілу концентрації CO₂ в атмосфері над територією адміністративних областей України. На цій основі було розраховано загальне зростання концентрації CO₂ в атмосфері (рис. 3) з січня 2003 по грудень 2005 рр. та розраховано тенденції міжрічного зростання концентрації CO₂ в атмосфері (табл. 3).

Слід зазначити, що аналіз даних про переважні напрями вітрів [5] над територією України підтверджує відповідність наведених на рис. 2 даних щодо можливого переносу забруднювальних речовин та промислової активності.

На основі отриманих даних було визначено розподіл змін концентрацій вуглекислого газу по місяцях в межах адміністративних областей України за вказаний період (рис. 4). Видно, що вміст CO₂ в атмосфері залежить від сезонів вегетаційного розвитку рослинного покриву (максимум CO₂ — в холодний період, мінімум — в теплий період року). Іншими словами, спостереже-

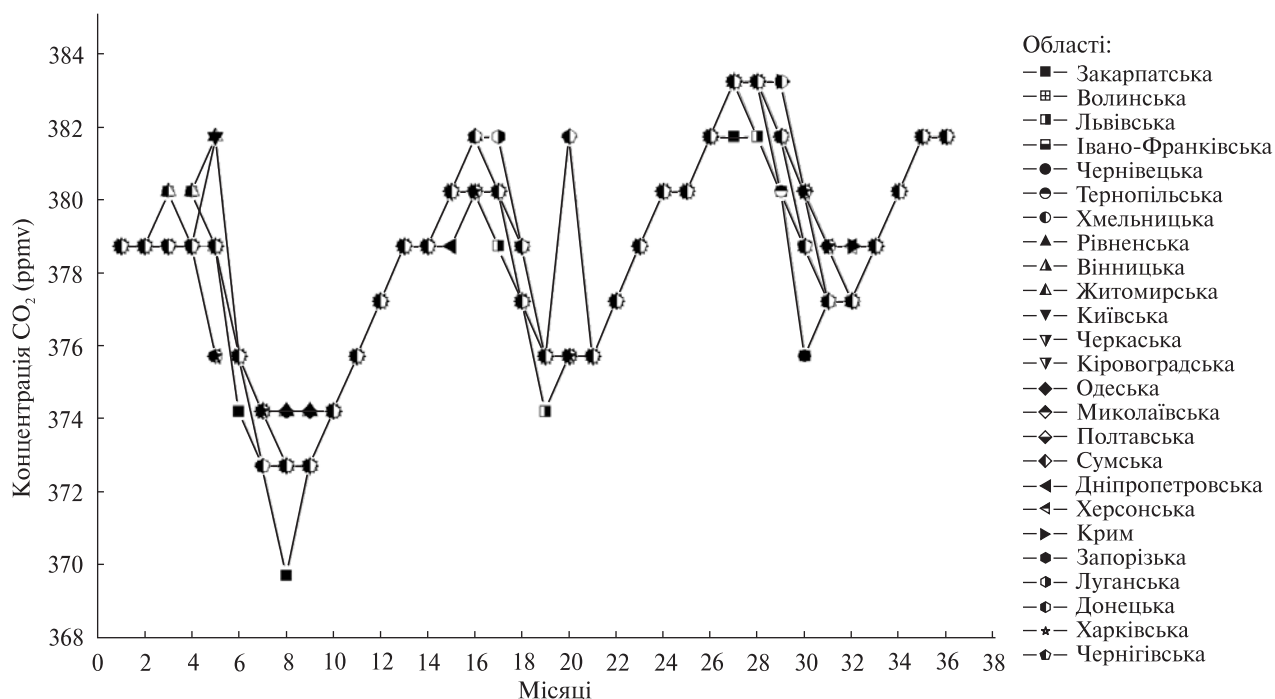


Рис. 4. Зміна концентрації CO_2 з 2003 по 2005 рр. в межах адміністративних областей

на динаміка вмісту вуглецевих газів відповідає періодам вегетації основних ландшафтних угруповань в межах України та загальним уявленням про природні процеси обміну між земною поверхнею і атмосферою.

З рис. 4 можна також зробити очевидний висновок, що розподіл концентрацій CO_2 в атмосфері над територією України не проходить по адміністративних кордонах областей. В цьому контексті необхідно застосовувати інформацію про фізико-географічне районування, у першу чергу про розподіл рослинного покриву та структуру землекористування [5].

Висновком аналізу стало підтвердження того, що концентрація CO_2 в атмосфері над територією України за три роки зростає. Найбільше зростання зафіксоване на заході та промисловому сході України. Над більшою частиною Львівської області зріст склав 5.083 ppmv, а над такими промисловими областями, як Донецька, Запорізька і Луганська — 4.834 ppmv. Найменший зріст концентрації CO_2 в атмосфері зафіксовано у Поліській зоні — 3.417 ppmv. Для 2005 р. найбільша се-

редньорічна концентрація атмосферного CO_2 зафіксована над територією Кримського півострова (381 ppmv при 376.333 ppmv у 2003 р.), Донецька, Запорізька і Луганська області мають також високі показники середньорічної концентрації (380.917 ppmv при 376.083 ppmv у 2003 р.). Найменший середній рівень концентрації атмосферного CO_2 за 2005 р. зафіксовано над Закарпатською областю (379.917 ppmv при 375.333 ppmv у 2003 р.). Слід зазначити, що отримані результати відповідають оцінкам фахівців IUP, в яких зазначено середньорічний глобальний зріст вмісту CO_2 з 2003 по 2005 рр. від 0.5 до 1.5 % [University of Bremen: IUP/IFE SCIAMACHY WFM-DOAS: http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/index.html] (наприклад, зріст CO_2 над більшою частиною Львівської області склав 0.755 % з 2003 по 2004 рр. і 0.6 % з 2004 по 2005 рр.).

Аналіз розподілу вмісту CO_2 в атмосфері дозволяє зробити припущення щодо можливих причин розбіжностей регіональних показників. Так, враховуючи багаторічні «рози вітрів» [5],

можна припустити, що на атмосферну концентрацію CO_2 в західних областях впливає перенесення забруднювачів (вуглецевих газів і аерозолів) з індустріальних районів центральної Європи (зокрема Сілезького басейну, промислового вузла Кошице тощо). Додатково слід зазначити, що пов'язані із зазначеними змінами зміни земних покривів та невизначене навантаження від промислових басейнів західних областей потребує додаткової уваги. В цьому контексті зростає роль наземних полігонів у західних регіонах України, зокрема у Волинській, Рівненській, Закарпатській і Львівській областях.

В центральних і частково причорноморських областях, переважно сільськогосподарських, зміни концентрації вуглецевих газів можна пояснити змінами у структурі землекористування, зокрема змінами у структурі посівів. Також важливою складовою є зміна структури опадів, викликана глобальною зміною тенденцій у взаємодії прибережної зони суходолу і моря. Крім того, слід враховувати антропогенний вплив у цих регіонах.

Східні області знаходяться під переважним впливом антропогенних факторів, і додатково — під впливом транскордонних факторів, відповідно до структури вітрів в цьому регіоні.

Узагальнюючи отримані результати, можна зробити припущення, що зростання атмосферної концентрації парникових газів над Україною пояснюється насамперед поглибленням загального антропогенного забруднення територій країни. Під впливом цього забруднення та змін основних кліматичних показників у глобальному масштабі [INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: <http://www.ipcc.ch/>] змінюються і структура землекористування на території України, що у свою чергу також змінює баланс CO_2 в атмосфері.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ДЗЗ ДЛЯ ОЦІНКИ ФОТОСИНТЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ПОТОКІВ CO_2 В ЕКОСИСТЕМАХ

Велика кількість проведених досліджень [6, 8, 9, 10] показала, що зміни коефіцієнта відбивання рослинного покриву у смузі $\lambda = 531$ нм пов'язані зі змінами у ксантофільному циклі рослин та за-

лежать від активності тилакоїдів, які безпосередньо беруть участь у процесі фотосинтезу.

Помічено, що індекс фотохімічного відбивання *PRI* певним чином залежить від коефіцієнта ефективності використання світла *LUE*. Цю залежність можна використати для покращення оцінки процесів фотосинтезу за допомогою даних дистанційного зондування [6, 8, 10].

Індекс *PRI* є індексом нормалізованої різниці коефіцієнта відбивання у двох вузьких смугах ($\lambda\lambda$ 531 та 570 нм), на який впливає вміст пігментів ксантофільного циклу [8]. При зміні потоку випромінювання в рослинному покриві відбуваються зміни у пігментному складі. Пігменти ксантофільного циклу можуть переходити з епоксидного стану (віолаксантин) до депоксидного стану (антераксин та зеаксантин), що впливає на розсіювання надлишку енергії.

Такі зміни в пігментному складі призводять до змін коефіцієнта відбивання в смузі $\lambda = 531$ нм, проте майже не впливають на нього у смузі $\lambda = 570$ нм. Розрахунок коефіцієнта *PRI* проводиться за формулою [10]

$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}, \quad (1)$$

де ρ_{531} , ρ_{570} — коефіцієнти відбиття листя відповідно у смугах $\lambda\lambda$ 531 та 570 нм. Для того щоб отримати масштабоване значення індексу *PRI*, для відображення його як величини ефективності, потрібно провести алгебраїчне перетворення:

$$sPRI = \frac{PRI + 1}{2}. \quad (2)$$

Також для оцінки потоків вуглецю між рослинністю та атмосферою широко використовується вегетаційний індекс нормалізованої різниці (*NDVI*) [13]. Індекс *NDVI* може розглядатися як частина фотосентитично активної радіації (f_{PAR}), що була поглинута зеленою рослинністю. Даний індекс розраховується за формулою

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (3)$$

де ρ_{NIR} , ρ_{RED} — відповідно коефіцієнти відбивання поверхні у ближньому інфрачервоному та червоному діапазонах.

Оскільки *NDVI* може безпосередньо виражатися як функція *FPAR*, то за допомогою *NDVI* та

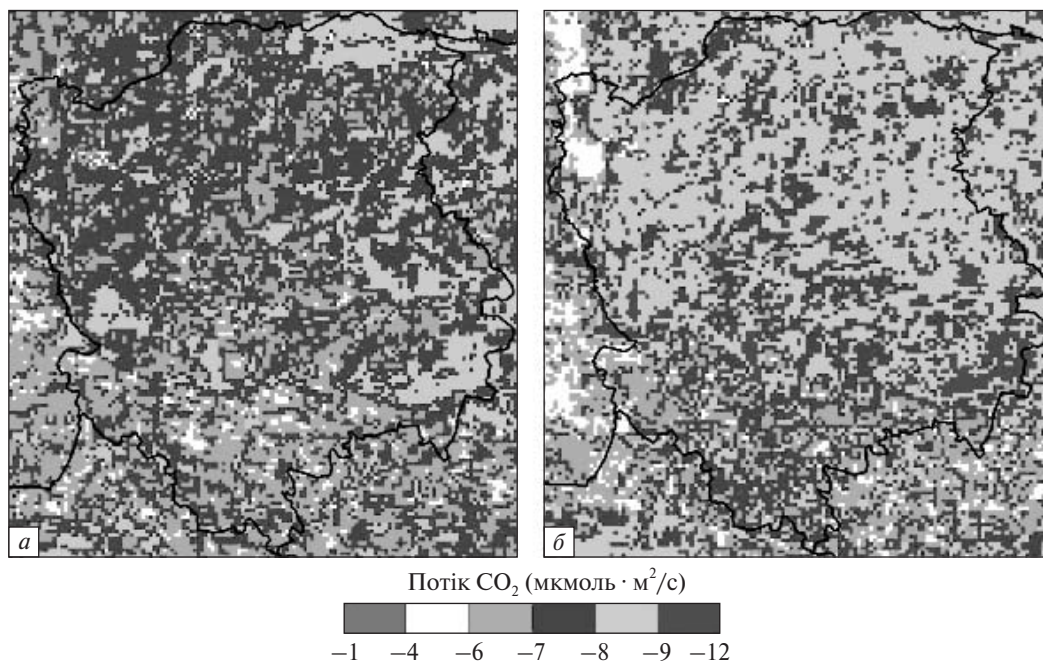


Рис. 5. Розподіл ефективності поглинання CO_2 рослинним покривом Волинської області, побудований на основі інтерпретації знімків MODIS від 19 серпня 2004 р. (а) та 22 серпня 2009 р. (б)

PRI можна оцінити швидкість фотосинтезу [11, 12]:

$$\begin{aligned} \text{Швидкість поглинання } \text{CO}_2 &= \\ &= f(sPRI \cdot NDVI). \end{aligned} \quad (4)$$

При зіставленні даних потоків CO_2 з індексами $sPRI$ та $NDVI$ було отримано емпіричну залежність [12]

$$\text{Потік } \text{CO}_2 = -4.3833 - 15.018 \cdot (NDVI \cdot sPRI). \quad (5)$$

Дана залежність дає можливість оцінювати ефективність фотосинтетичних процесів у рослинному покриві на основі багатоспектральних космічних знімків, що може використовуватися для порівняння ефективності поглинання CO_2 рослинними покривом у різні періоди та виявлення динаміки продуктивності рослинного покриву певної території. На рис. 5 наведено результат подібної інтерпретації для Волинської області.

Важливим для оцінки стоку вуглецю в рослинний покрив також є використання інформаційного продукту MOD17 [14], що дає змогу оцінити загальну річну чисту первинну продук-

тивність (NPP) рослинного покриву над дослідною територією.

З використанням отриманих даних про поглинальну здатність різних типів рослинного покриву, площі відповідних типів рослинного покриву та дані відносно промислових викидів CO_2 для території України був розрахований баланс вуглецю для території України.

На рис. 6 представлено графічне відображення співвідношення промислових викидів CO_2 до його поглинання рослинністю для областей України. Як видно з результатів, в 14 областях України спостерігається незначне переважання поглинання CO_2 над його промисловими викидами. Це переважно області західного та північного регіонів України, які мають значну площу заліснення та низький рівень розвитку промисловості. Так, «лідерами» у поглинанні CO_2 можна назвати Житомирську, Волинську та Чернігівську області, де спостерігається переважання поглинання над викидами на рівні 174, 162 та 160 $\text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1}$ відповідно. Промислово розвинені Донецька, Дніпропетровська і Луганська

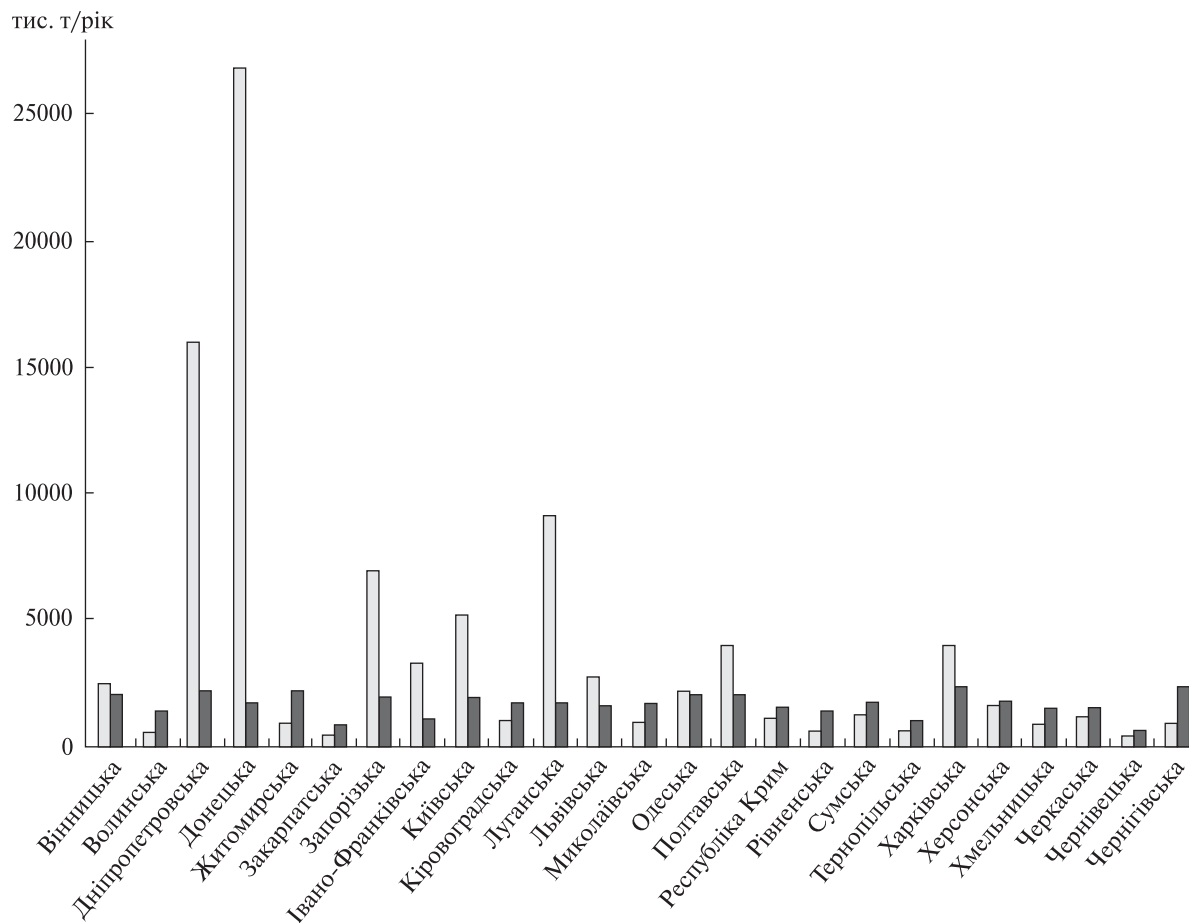


Рис. 6. Співвідношення річних об'ємів промислових викидів (світлі стовпці) та поглинання CO₂ рослинністю (темні стовпці) для областей України у 2000 р.

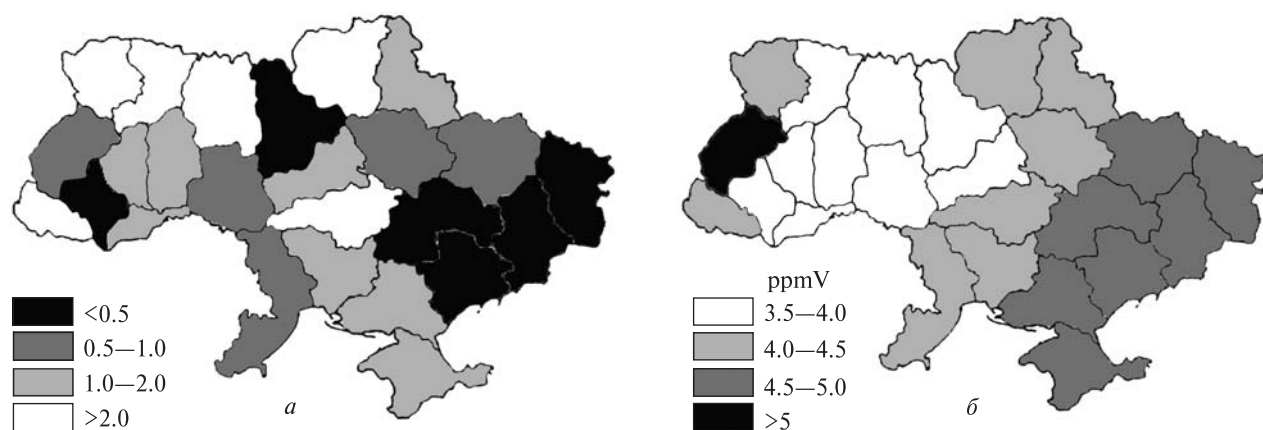


Рис. 7. Співвідношення поглинальної здатності CO₂ рослинності до промислових викидів (а) та зростання концентрації CO₂ в атмосфері в період 2003—2005 рр. за даними приладу SCIAMACHY (б)

області лідирують за промисловими викидами CO_2 (відповідно 3477, 1586, 1016 $\text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1}$). Сумарне ж значення для України в цілому вказує на переважання промислових викидів над поглинанням CO_2 приблизно удвічі, що становить 319 $\text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1}$.

Ці результати були зіставлені з фактичними даними зростання концентрації CO_2 в атмосфері над Україною, які були отримані за допомогою приладу SCIAMACHY [4] (рис. 7). Порівнюючи рис. 7, а та б, можна побачити, що над областями, які є найбільшими джерелами промислового CO_2 , в останні роки спостерігається більш інтенсивне зростання концентрації CO_2 в атмосфері. Зокрема це стосується південно-східного промислового регіону, де надзвичайно розвинена гірнична та металургійна промисловість, а також західного промислового регіону (Львівська та Івано-Франківська області) де розвинена нафто-газопереробна промисловість. Звичайно, також потрібно враховувати і особливості переносу та перемішування повітряних мас, внаслідок чого частина викидів переноситься на інші регіони. Так, стрімке зростання концентрації CO_2 в атмосфері над Львівською областю важко пояснити лише кількістю промислових викидів, оскільки вона в цьому регіоні значно менша, ніж, наприклад, у Донецькій чи Дніпропетровській областях, де зростання концентрації CO_2 в атмосфері проходить не так інтенсивно. Не виключено, що ця аномалія більш високої концентрації CO_2 над західними областями викликана вітровим привнесенням повітряних мас з промислових територій західних країн, оскільки річна роза вітрів тут сприяє формуванню подібного ефекту.

ВИСНОВКИ

На сьогодні моніторинг та прогнозування кліматичних та інших природних змін, як у глобальному, так і у регіональному масштабах, є однією з найбільш важливих проблем сталого розвитку людства. Для ефективного рішення цієї задачі було запропоновано використання даних супутникових зйомок. Так, для оцінки змін концентрації CO_2 в атмосфері можна використовувати дані спектрометра SCIAMACHY та інших подіб-

них сенсорів. Для оцінки балансу CO_2 в екосистемах ефективним методом є аналіз багатоспектральних знімків таких сенсорів, як «Landsat», SPOT, MODIS та ін.

Проведений аналіз дозволив визначити кілька важливих тенденцій у змінах земної поверхні, які суттєво впливають на вуглецевий баланс території України.

У першу чергу підтверджено наявність тенденції до змін ландшафтних комплексів та складу рослинних угруповань. Зафіксовано зміни на близько 10 % площ. Враховуючи дані про роль різних типів рослинності у формуванні вуглецевого балансу, можна припустити, що тенденція накопичення вуглецю в атмосфері зберігається.

Отримані дані ENVISAT/SCIAMACHY вказують на сезонні коливання концентрації CO_2 в атмосфері, що пов'язано з впливом рослинного покриву, а також мають тенденцію до зростання в міжрічному розрізі. В західній частині України це відбувається, скоріш за все, за рахунок трансграничного перенесення повітряних мас з індустриальних районів Європи, а на сході — найбільший вплив має вугільна промисловість.

В загальному ж для території України, за попередніми даними, які потребують уточнення, характерне переважання антропогенної емісії CO_2 над поглинанням його рослинним покривом більш ніж у два рази. Основними джерелами викиду CO_2 в атмосферу є південно-східний та західний індустриальні регіони України.

1. Бунь Р. А., Густі М. І., Дачук В. С. та ін. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України / Під ред. Р. А. Буныя. — Львів: Укр. академія друкарства, 2004. — 376 с.
2. Воронин П. Ю. Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода на территории Северной Евразии // Физиология растений. — 2006. — 53, № 5. — С. 777—785.
3. Лархер В. Экология растений. — М.: Мир, 1978. — 384 с.
4. Лялько В. І., Артеменко І. Г., Жолобак Г. М. та ін. Дослідження впливу змін CO_2 та CH_4 в атмосфері на клімат за матеріалами космічних зйомок // Геологічний журн. — 2007. — № 4 — С. 7—16.
5. Руденко Л. Г., Чабанюк В. С. Бочковська А. І. та ін. Атлас України: Інтелектуальні системи ГЕО. 1999—2000.

6. Barton C. V. M., North P. R. J. Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index. Model and sensitivity analysis // *Remote Sens. Environ.* — 2001. — **78**. — P. 264–273.
7. Buchwitz M., de Beek R., Noël S., et al. Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: version 0.5 CO and CH₄ and impact of calibration improvements on CO₂ retrieval // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2006. — **6**. — P. 2727–2751.
8. Drolet G. G., Huemmrich K. F. A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest // *Remote Sens. Environ.* — 2005. — **98**. — P. 212–224.
9. Gamon J. A., Huemmrich K. F., Peddle D. R., et al. Remote sensing in BOREAS: Lessons learned // *Remote Sens. Environ.* — 2004. — **89**. — P. 139–162.
10. Penuelas J., Filella I., Gamon J. A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance // *New Phytologist*. — 1995. — **131**. — P. 291–296.
11. Rahman A. F., Gamon J. A., Fuentes D. A., et al. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery // *AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, California, 2000*.
12. Rahman A. F., Gamon J. A., Fuentes D. A., et al. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106D**, N 24. — P. 33,579–33,591.
13. Ruimy A., Kergoat L., Bondeau A. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of differences in light absorption and light-use efficiency // *Global Change Biology*. — 1999. — **5**. — P. 56–64.
14. *User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products. Version 2.0* — MODIS Land Team, 2003. — 57 p.

Надійшла до редакції 01.10.11

V. I. Lyalko, A. I. Sakhatsky, Yu. V. Kostyuchenko,
I. G. Artemenko, G. M. Zholobak, E. I. Levchik,
D. M. Movchan

SPACE MONITORING OF BALANCE OF GREENHOUSE GASES TO CLARIFY THEIR INVENTORY

In Ukraine, during 2006–2011, workers from the Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the IGS of NAS of Ukraine have been elaborating a method for the monitoring of the balance of the greenhouse gases to clarify the amount of their emission and absorption using satellite data. The proposed methods allow one to carry out an independent monitoring of the balance of carbon dioxide in the atmosphere on the basis of information from different satellites. According to expert estimates the CO₂ component is over 75 % of the total greenhouse gas emissions within the territory of Ukraine. We propose to use satellite data for the estimation of the balance of natural and anthropogenic emissions of carbon dioxide and its absorption by vegetation photosynthetic activity of large areas and for the monitoring of the CO₂ content in the atmosphere in different landscapes of various climatic zones and territorial units of Ukraine.